被加工部位への二波長同時照射を可能にする 回折ビームスプリッタの設計

尼子 淳

東洋大学 理工学部 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

Design of Diffractive Beam Splitters for Dual-Wavelength and Concurrent Irradiation of Process Points

Jun AMAKO

Faculty of Science and Engineering, Toyo University, 2100 Kujirai, Kawagoe, Saitama 350-8585

(Received August 13, 2012)

We report the design of diffractive beam splitters for dual-wavelength laser processing. They produce beam arrays for two different wavelengths in the way the arrays coincide at target points on a workpiece to process. The digitized surface profiles of the dual-wavelength splitters were designed using an iterative algorithm by considering the splitting performances, the material dispersion, and the wavelengths. For the chosen wavelengths of 1064 and 266 nm, as an example, we needed 32 phase levels and 42 pixels to obtain splitting efficiencies of $>80\%$ and splitting uniformities of >0.90 . The minimum pixel width was $\sim 1\%$ of the splitter period. The tolerances of the profile errors were found to be $\sim 1\%$ of the designed depths. The shorter the wavelength is, the more sensitive the splitter performances are to the errors. Using achromatic splitters we can exploit the advantages of dual-wavelength laser processing and attain a high throughput.

Key Words: Diffraction, Beam splitter, Dual wavelength, Iterative algorithm

1. はじめに

レーザー加工の生産性を高める手段として、回折ビームスプリッタ (Diffractive Beam Splitter: DBS) はその有効性をさまざまな加工用途で実証してきた¹⁻³⁾。DBSにより発生させたビーム列で被加工物の多数の部位を同時に加工すれば生産性は上がる。通常、加工にはひとつのレーザー波長を用いるが、ふたつの波長を同時に用いると、加工条件が緩くなるあるいは加工品質が向上する場合がある⁴⁻⁶⁾。ふたつの波長を用いる加工には、それぞれの波長において同じ回折角度にエネルギーを集めるビーム列を発生させるDBSが必要となる。

広域波長や複数波長で使えるDBSの研究は、イメージング、分光そして光情報処理の諸分野では活発に進んだ⁷⁻¹⁰⁾。これらの用途では、異なる波長の光波は異なる場所へDBSにより集光される。構造体の設計にはフーリエ反復法やバイナリサーチ法が使われ、複数の波長へ対応できるように評価関数の形が拡張されている^{11,12)}。本研究のように、複数レーザー波長を用いる加工やプロセスへのDBSの応用をめざした研究は少ない。

本論文では、二つの異なる波長で機能するDBSの設計について報告する。本研究のDBSには、二波長の光を同

じ場所(被加工部位)へ効率よく集めることが求められる。そのため、従来のDBSの設計と比べて解を探索するときの拘束条件が厳しいという難しさがある。この点を考慮し、計算の出発点に関わらず最適解へ到達可能なシミュレーテッドアニーリング法を用いることにした。フーリエ反復法やバイナリサーチ法では、計算の到達点が初期条件に左右されやすく、局所解へ捕まる可能性が高い。2節で二波長DBSの機能を説明する。3節で設計方法について述べ、シミュレーテッドアニーリング法を用いた設計の留意点について触れる。4節では、加工へよく使われるレーザー波長の組み合わせに対する設計例をとりあげ、DBSの凹凸形状とビーム分岐性能を示す。5節では、形状誤差が性能へ与える影響を計算機シミュレーションして、誤差の許容量を明らかにする。

2. 二波長DBSの機能

Fig. 1に、二波長DBSを用いたレーザー加工法を示す。二本のレーザービームをビームコンバイナで光軸上に合成してDBSへ入射する。DBSで均等に分岐された複数のビームをレンズで集光し、ふたつのビーム列をつくる。これらのビーム列は被加工物上で複数の加工点に重

Fig. 1 Schematic drawing of laser processing with a dual-wavelength DBS.

なる(ビーム回折角度を誇張して図示している)。そのためには、二本のビームに基本波とその倍波を選ぶ。図中のレンズはアクロマチックであり、二波長に対してほぼ同じ焦点距離をもつ¹³⁾。この加工法には二波長同軸発振のレーザーを用いてもよいが、二本のビームの強度と両者の強度比を設定するとき制約を受ける。

ふたつのビーム列がレンズ集光面の同じ場所を照射する条件を導く。説明を簡単にするために一次元のビーム列を考えると、波長 λ_1 、 λ_2 に対するビームの集光位置 x_1 、 x_2 は以下のように決まる。

$$x_1 = m_1 \lambda_1 f / p, \quad x_2 = m_2 \lambda_2 f / p \quad (1)$$

ここで、 m_1 、 m_2 は回折次数、 f はレンズ焦点距離、 p はDBSの周期である。 f と p は波長 λ_1 、 λ_2 に対して共通とする。このとき、二本の回折ビームが重なる条件は次式で与えられる。

$$m_1 \lambda_1 = m_2 \lambda_2 \quad (2)$$

例えば、 λ_1 を基本波、 λ_2 を二倍波とすると、ふたつのビーム列におけるビームの回折次数は、 $2m_1 = m_2$ という関係を満足する。

3. 設計方法

Fig. 2は、二波長DBSの設計に用いる量子化された形状モデルである。DBSの一周期を複数の区間に不等間隔に分割し、区間毎に高さ(すなわち位相値)を決める。このような問題には反復アルゴリズムが有効であり、筆者らはシミュレーテッドアニーリグ法を用いた¹⁴⁾。設計の主な条件は、ビーム分岐数、ふたつの波長、DBSの基材の屈折率である。屈折率の波長分散も考慮する。

初期条件としてランダムに与えた分割位置と位相値に変化を加え、反復的にDBSの形状を最適化する。変化を受け入れるかどうかの判定には、次式(3)で定義する評価関数を使う。

Fig. 2 Surface profile model for DBS design.

$$F = \sum w_i \left\{ \sum [I_m(\lambda_i) - \alpha_m(\lambda_i)]^2 \right\} : i = 1, 2 \quad (3)$$

ここで、 I_m は m 次回折光の強度、 i は波長毎に付けた番号、 w_i は重み、 α_m は回折光強度の目標値である。目標値は何度か計算を試行した後で決めた。ビーム分岐性能の設計値と目標値の差を最小二乗法で評価し、回折光強度が目標値へ十分近くなるまで計算を反復する。後で示すように、倍波のビーム列では加工に必要なビームと不要なビームが交互に並ぶため、不要なビームが極小となるような最適化は欠かせない。二波長に対するDBSの性能は競合するため、両者のバランスをとるために重み w_i を設定する。スカラー回折理論にしたがうと¹⁵⁾、フーリエ変換の式を用いて0次透過光の強度と m 次回折光の強度を以下のように導くことができる。ただし、DBSの一周期の長さを1に規格化した。

$$I_0(\lambda_i) = \left| \sum_{k=0}^{N-1} \exp(j\phi_k(\lambda_i)) [x_{k+1} - x_k] \right|^2, \\ I_m(\lambda_i) = (1/2\pi m)^2 \times \left| \sum_{k=0}^{N-1} \exp(j\phi_k(\lambda_i)) [\exp(j2\pi m x_{k+1}) - \exp(j2\pi m x_k)] \right|^2 : i = 1, 2 \quad (4)$$

ここで、 $\phi_k(\lambda_i)$ は量子化された位相値、 x_k は分割位置、 N は分割位置の総数である。一般的なレーザー加工用途ではDBSの周期がレーザー波長よりも一桁以上大きい^{1,2)}。こうした条件ではDBSの回折効率特性が入射偏光に依存しない¹⁶⁾。偏光依存性を考慮しなくてもよい場合には、スカラー近似で回折光強度を計算できる。設計において位相値 $\phi_k(\lambda_i)$ は次の Q 個の値からランダムに選ぶ： (k/Q) $\phi_i : k = 0, 1, \dots, Q-1 ; i = 1, 2$ 。ただし、 Q は量子化数、 ϕ_i は最大位相値である。 ϕ_1 と ϕ_2 の間には

$$\phi_1 \lambda_1 / [n(\lambda_1) - 1] = \phi_2 \lambda_2 / [n(\lambda_2) - 1] \quad (5)$$

という関係が成り立つ。ここで、 $n(\lambda_1)$ と $n(\lambda_2)$ は波長 λ_1 、 λ_2 に対するDBSの基材の屈折率である。本研究では、波長 λ_1 、 λ_2 の長い方に対する位相の最大値を 2π とした。 2π 程度の位相変調深さをもつ回折構造体を与える効率は90%を超えることがわかっている¹⁷⁾。もっと大きな位相値でも高い効率は得られるが、小さいほうが製作上は有利である。

所望の解が見つかるかどうかは、初期形状、アニーリング条件そして評価関数の重みに左右される。疑似乱数を使って初期形状を与えるため、分割点数の多少にも関係するが、乱数発生の初期値が計算の収束性に影響する。Fig. 3は、反復過程における評価関数 F の変化を示す典型的な例である。アニーリング温度 T の降下とともに関数値は徐々に小さくなり、DBSの形状が解に近づくと同関数値は急速に減少して収束へ向かう。本研究ではアニーリング温度を $T_k = T_0 \beta^k$ の形で与えた。ただし、 T_k は反復 k 回目の系(解が存在する空間)の温度、 T_0 は初期温度、 β は温度降下係数である。評価関数値とアニーリング温度は無次元の量である。後述する設計例では $T_0 > 1.0$ 、 $1.0 > \beta > 0.95$ とした。この条件よりも β を小さくする(速く冷やす)と系の温度平衡状態が得られず、計算が収束しない場合があったからである。反復回数はおよそ200000である。計算を反復するたびに系の温度を平衡にして、少なくとも一回は全ての区間を選び、その区間の位相値に変化を与えた。式(3)の重みについては、ふたつの波長を同等に扱ったため、 $w_1 = w_2 = 1.0$ とした。一方の波長に対する重みを1、他方の波長に対する重みを0とすれば、前者にだけ機能するDBSを設計できる。

4. 設計例

Nd:YAGレーザーで用いる二波長DBSの例をとりあげ、3節の方法で設計したDBSの形状とその形状が与えるビーム分岐性能を紹介する。このレーザーは穴開け、切断、接合などの加工へ広く使われる。基本波の波長は1064 nm、二倍波、三倍波、四倍波の波長はそれぞれ532, 355, 266 nmである。基本波と3つの倍波それぞれの組み合わせに対してDBSを設計した。ビーム分岐数を9本として、基本波に対して0, ± 1 , ± 2 , ± 3 , ± 4 の回折次数を選んだ。DBSの形状は中央を境に左右対称とした。こうすると、DBSの製作に用いる形状データの量は(対称としない場合の)半分に減る。DBSの基材として、紫外から近赤外の波長で透明な石英ガラスを想定した。

DBSへ求める性能は、筆者らの加工用途から、光利用効率 $> 80\%$ 、分岐均一性 > 0.90 とした。効率はビーム列へ集中するエネルギーの割合、均一性はビーム列におけ

Fig. 3 Merit function vs. annealing temperature.

る最小強度と最大強度の比で定義される。均等にビームを分岐することにより、被加工物上の複数部位で均一な加工が可能となる。効率と均一性の理論上の最大値を設計前に知ることは難しい。二波長それぞれに対する回折効率特性が互いに独立ではないからである。

以下に図示する形状において、深さは最大値で規格化した値であり、最小線幅は一周期に対する相対値である(設計では一周期を1に規格化した)。ビーム列の強度分布は、手前が基本波のデータ、奥が倍波のデータである。

4.1 1064 nmと532 nmの組み合わせ

計算条件として与えた一周期の分割数は40、位相の量子化数は32(0-31)である。ふたつのビーム列が重なるための条件(式(2))から、波長532 nmに対する回折次数を0, ± 2 , ± 4 , ± 6 , ± 8 と一本おきを選んだ。設計後に得られたDBSの凹凸形状(一周期)をFig. 4 (a)に、ビーム列の強度分布をFig. 4 (b)にそれぞれ示す。Fig. 4 (a)で、最小線幅は0.0056である。Fig. 4 (b)で、波長1064 nmに対するDBSの性能は効率81%、均一性0.92である。波長532 nmでは、効率85%、均一性0.95である。二倍波のビーム列における加工に不要な次数の回折光強度は0.0から0.0053であり、加工に必要な次数の回折光強度の平均0.095と比べて十分に小さい。

4.2 1064 nmと266 nmの組み合わせ

設計条件として与えた一周期の分割数は42、位相の量子化数は32(0-31)である。ふたつのビーム列が重なるための条件(式(2))から、波長266 nmに対する回折次数を0, ± 4 , ± 8 , ± 12 , ± 16 と三本おきを選んだ。設計後に得られたDBSの凹凸形状(一周期)をFig. 5 (a)に、ビーム列の強度分布をFig. 5 (b)にそれぞれ示す。Fig. 5 (a)で、最小線幅は0.011である。Fig. 5 (b)で、波長1064 nm

Fig. 4 Design example for the two wavelengths, 1064 nm and 532 nm: (a) surface profile and (b) diffraction intensities.

に対するDBSの性能は効率84%, 均一性0.96である。波長266 nmでは, 効率83%, 均一性0.94である。四倍波のビーム列における加工に不要な次数の回折光強度は0.0から0.0058であり, 加工に必要な次数の回折光強度の平均0.092と比べて十分に小さい。

DBSの形状を二波長で設計する場合は, ひとつの波長で設計する場合よりも多くの区間数と位相値を必要とする。短い方の波長に対して, 等間隔で離れて並ぶ複数の回折次数だけに光を集めることが要求されるからである。図示していないが, 基本波と三倍波の組み合わせに対しても解を得ている。異なる分岐数での設計あるいは倍波どうしの組み合わせについても設計が可能である。

5. 形状誤差の影響

二波長DBSの性能はその形状誤差に大きく影響される。筆者らはDBSの製作時に問題となる誤差をスケーリング誤差とランダム誤差で近似し, シミュレーションにより誤差の許容量を見積もった。スケーリング誤差は場所によらず一定の割合で設計形状を浅くする(あるいは深くする)誤差である。ランダム誤差は場所毎にあらかじめ定めた誤差範囲からランダムに選んで設計形状へ加える誤差である。4節で図示した設計形状へこれらの誤差を加え, 式(4)により効率と均一性を計算した。以下に示すFig. 6, Fig. 8では, 横軸のscaled depth = 1.0の条件が, 誤差のない形状に対応する。

5.1 1064 nmと532 nmの組み合わせ

Fig. 6 (a)に効率とスケーリング誤差の関係を, Fig. 6 (b)に均一性とスケーリング誤差の関係を示す。Fig. 7 (a)に効率とランダム誤差の関係を, Fig. 7 (b)に均一性とランダム誤差の関係を示す。

Fig. 5 Design example for the two wavelengths, 1064 nm and 266 nm: (a) surface profile and (b) diffraction intensities.

5.2 1064 nmと266 nmの組み合わせ

Fig. 8 (a)に効率とスケーリング誤差の関係を, Fig. 8 (b)に均一性とスケーリング誤差の関係を示す。Fig. 9 (a)に効率とランダム誤差の関係を, Fig. 9 (b)に均一性とランダム誤差の関係を示す。

Fig. 6 Beam splitting performance vs. scaled depth for the DBS profile in Fig. 4: (a) efficiency and (b) uniformity.

Fig. 7 Beam splitting performance vs. random error for the DBS profile in Fig. 4: (a) efficiency and (b) uniformity.

Fig. 8 Beam splitting performance vs. scaled depth for the DBS profile in Fig. 5: (a) efficiency and (b) uniformity.

これらの解析結果から以下のことがわかる。ここでは、均一性が0.9以上となる誤差範囲を誤差の許容量と定めた。

- ・効率よりも均一性が誤差に敏感であり、波長が短いほど誤差の影響が大きい傾向がある。
- ・スケーリング誤差の許容量は設計深さの1%以上であり、基本波は倍波よりも許容量が大きい。
- ・ランダム誤差の許容量は、基本波では設計深さの1%程度、高調波では設計深さの1%以下である。

DBSの製作時には、その量子化された深さ h_k を次式から決める。

$$h_k = (k/Q)(\lambda/(n-1)) : k = 0, 1, \dots, Q-1 \quad (6)$$

例えば、 $\lambda = 1064 \text{ nm}$, $Q = 32$, $n = 1.45$ (石英ガラス) とすると、最大深さは $h_{31} = 2291 \text{ nm}$ 、ひとつの段差の高さは 74 nm となる。5節で示したように深さの許容誤差は最大深さの1%程度であるから、その絶対値は $\sim 20 \text{ nm}$ となる。横方向については、例えばDBSの一周期を $100 \mu\text{m}$ とすると、最小線幅は $\sim 0.5\text{--}1 \mu\text{m}$ となる。Fig. 4, Fig. 5の形状で、最小線幅はそれぞれ一周期の0.5と1%である。この線幅を描くには $\sim 100 \text{ nm}$ の解像度が必要であり、深さ方向に段差が多い点も考慮すると、電子ビームリソグラフィが必須となる。

6. おわりに

レーザー加工への応用を目的とし、二波長で機能するDBSの設計について報告した。実用的な波長の組み合わせに対して、高いビーム分岐性能を与えるDBSの形状が

Fig. 9 Beam splitting performance vs. random error for the DBS profile in Fig. 5: (a) efficiency and (b) uniformity.

存在することを示した。アクロマチックなDBSを用いると、高スループットを達成しつつ、二波長レーザー加工の恩恵を享受できる。もちろんレーザー加工光学系も簡便になる。一方、シミュレーション結果から明らかなように、二波長DBSは形状誤差の許容量が小さいため良品を大量につくるのは難しい。製作コストに相応しい、付加価値の高い加工用途へDBSを使っていく。

参考文献

- 1) J. Amako, T. Shimoda, and K. Umetsu: *Proc. SPIE* **5339** (2004) 475.
- 2) J. Amako, E. Fujii, Y. Yamazaki, and T. Shimoda: *Proc. SPIE* **6107** (2006) 61070D1.
- 3) 布施 敬二: レーザー研究 **35** (2007) 309.
- 4) 特許公開2006-297464.
- 5) 特許公開2008-85236.
- 6) 坂本 雅典, 真嶋 哲郎: 生産と技術 **61** (2009) 44.
- 7) I. M. Barton, P. Blair, and M. R. Taghizadeh: *Opt. Express* **1** (1997) 54.
- 8) J. Bengtsson: *Appl. Opt.* **37** (1998) 2011.
- 9) T. R. M. Sales and D. H. Raguin: *Appl. Opt.* **38** (1999) 3012.
- 10) 小倉 祐介, 臼井 伸弘, 谷田 純: 光学 **30** (2001) 183.
- 11) F. Wyrowski and O. Bryngdahl: *J. Opt. Soc. Am.* **A5** (1988) 1058.
- 12) M. A. Seldowitz, J. P. Allebach, and D. W. Sweeney: *Appl. Opt.* **26** (1987) 2788.
- 13) 石黒 浩三: 光学 (裳華房, 1982) p.48.
- 14) M. Nieto-Vesperinas, R. Navarro, and F. J. Fuentes: *J. Opt. Soc. Am.* **A5** (1988) 30.
- 15) J. W. Goodman: *Introduction to Fourier Optics*, 3rd ed. (Roberts & Company, 2005) p.356.
- 16) R. Magnusson and T. K. Gaylord: *J. Opt. Soc. Am.* **68** (1978) 806.
- 17) 日本光学会 監修: 回折光学素子入門 (オプトロニクス社, 2006) p.68.